某型水陆两栖飞机水面高速滑行振动研究

李俊龙,杨仕福,吕继航

(中航通飞华南飞机工业有限公司,519040 珠海)

摘　要:某型水陆两栖飞机在某次试飞过程中的水面高速滑行阶段出现海豚运动和机翼振动的异常现象,针对该现象展开原因分析研究。首先,建立飞机结构动力学有限元模型,研究弹性体飞机的固有动力特性;然后,建立双质量弹簧系统模型,结合水动力学研究飞机在水面滑行的运动特性;最后,结合飞机固有动力特性和水面高速滑行运动特性,分析飞机在水面高速滑行过程中机翼产生异常振动的原因。研究结果表明:飞机着水时因着水姿态以及自身静稳性等因素发生海豚运动;在某个运动时刻,当运动固有频率与机翼的一阶弹性模态频率耦合导致机翼振动。研究结果既为后续研究异常避免措施以及保证滑行试飞安全,提供了理论依据;也为水陆两栖飞机振动设计以及水面高速滑行振动分析提供了一种研究思路。

关键词:水面滑行;海豚运动;振动;双质量弹簧系统;垂荡

中图分类号:V215.3　　　　**文献标志码:**A

Study on hydroplaning of a certain amphibious aircraft with high speed

LI Junlong, YANG Shifu, LÜ Jihang

(AVIC General Huanan Aircraft Industry Co., Ltd., 519040 Zhuhai, China)

Abstract: The abnormal phenomena of porpoising and wing vibration occurred in the high-speed skating stage of a certain amphibious aircraft during a test flight. The causes of this phenomenon were researched. Firstly, a structural dynamic finite element model is established to study the nature dynamic characteristics of the elastic aircraft. Then, the two-mass spring system model is established to study the motion characteristics of aircraft skating on water surface combined with hydrodynamics. Finally, combined with the nature dynamic characteristics of the aircraft and the heave characteristics of high-speed skating on the water surface, the causes of abnormal wing vibration during high-speed skating on the water surface are analyzed. The results show that the porpoising occurs due to the landing attitude and static stability. At a certain moment of motion, when the natural frequency of motion is coupled with the first-order elastic modal frequency of the wing, the wing vibration is caused. The research results not only provide a theoretical basis for the follow-up study of abnormal avoidance measures and ensuring the safety of taxiing flight test. It also

收稿日期:2022-04-22　　　**修回日期:**2022-05-11

基金项目:工业和信息化部民用飞机专项科研资助项目(No. MJ-2018-F＊＊)

通信作者:李俊龙,助理工程师。E-mail:lijunlong132@126.com

引用格式:李俊龙,杨仕福,吕继航.某型水陆两栖飞机水面高速滑行振动研究[J].应用力学学报,2022,39(3):462-467.

LI Junlong, YANG Shifu, LÜ Jihang. Study on hydroplaning of a certain amphibious aircraft with high speed[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(3): 462-467.

provides a research idea for the vibration design of amphibious aircraft and the vibration analysis of high-speed taxiing on the water surface.

Key words: hydroplaning; porpoising; vibration; two-mass spring system; heave

水陆两栖飞机,振动设计要求必须满足中国民用航空规章第 25 部中的相关规定[1]。一方面要求飞机在飞行包线内不能出现过度振动;另一方面要求飞机在出现一定故障的情况下,机体结构仍具备承受一定振动的能力[2]。

由于机型的特殊性,水陆两栖飞机的振动现象除其他常规民用机型振动出现场景之外,还有一个特殊的场景,即在水面滑行过程中发生振动。结构物的水面滑水运动广泛存在于各大工程领域,例如航空工程的直升机水面迫降滑行[3],船舶工程的快艇高速滑水[4],航天工程的宇宙飞船返还舱水面降落滑水[5]以及兵器工程的空投鱼雷水面滑行[6]等。在水面滑水过程中,结构若发生持续的大幅振动,不仅干扰操纵,影响结构物的滑行安全,对人员和财产带来安全隐患;而且持续的大幅振动带来的结构损伤和疲劳问题也不容忽视,对结构物的服役寿命也带来很大影响。因此,在水面滑水过程中避免结构物产生过度振动现象,是各大相关工程领域前期的振动设计以及后期的工程应用中的无比重要的一环。

在飞机水面滑行过程中引起的机体振动原因有很多,例如水面波浪环境等因素引起的飞机机体受迫振动;水面波浪遭遇频率与飞机某部件固有频率耦合引起共振;飞机某部件的模态频率与飞机在波浪上的摇荡运动(如横摇、俯仰、垂荡等)固有频率耦合引起共振等。

某型水陆两栖飞机在试飞过程中的高速滑水阶段出现了海豚运动及机翼大幅振动的异常现象。对于造成该异常现象的原因,飞行员排除了操纵不当的可能性。本研究结合结构动力学、弹性体运动学理论、水动理论、振动理论及水陆两栖飞机的自身特点,分析机翼产生振动的原因。

1 海豚运动

某型水陆两栖飞机在某次试飞过程中的水面高速滑行阶段出现了海豚运动以及机翼振动的不稳定现象,如图 1 所示。着水时,飞机在船底断阶附近着水;当着水水面稳定之后,水面的波面情况基本平静,波浪忽略不计。滑行过程中,一方面,机翼出现大幅度的振动现象;另一方面,飞机断阶着水附近区域结构随着向前滑行的过程,反复高频地出水与入水,即飞机出现海豚运动现象。



图 1 飞机的水面滑行

Fig. 1 The plane gliding on the water

飞机的海豚运动发生于水面滑行期间,因与海豚在水面上的跳跃运动相似而得名。海豚运动是飞机在水面滑行过程中的一种周期性的垂荡(沿 z 轴的平动)与纵荡(绕 y 轴的转动)相互耦合的运动现象[7],如图 2 所示。



图 2 飞机的海豚运动

Fig. 2 The porpoising of the plane

由受力分析可知,飞机在水面滑行时,只有当重心在水动力作用点之前时,才能保证飞机在滑行过程中的纵向稳定性,且重心与水动力作用点距离越大,抗干扰能力就越强,即飞机在水面滑行的纵向稳定性越好。当飞机在水面受到外界干扰时,漂浮姿态发生改变,从而导致水动力作用点位置发生变化,进而影响飞机的运动状态。若干扰为低头干扰,水动力作用点位置向前移动,当前移至重心位置之前时,在水动力矩的作用下,飞机抬头。同样地,飞机抬头致使水动力作用点位置向后移动。当移动至平衡位置时,飞机在惯性作用下继续保持抬头运动,水动力作用点位置继续向后移动。此时水动力和气动力的合力小于重力,抬头速度逐渐降低至 0,开始反向,飞机低头。周期性循环该过程,就形成了耦合的周期性的纵摇与垂荡运动,即海豚运动。

某型水陆两栖飞机在着水时,单位面积承受的水动载荷较大,引起了水动力作用点的运动,进而导致了海豚现象的发生。根据试飞监控数据,在水面高速滑行时,纵摇俯仰角变化幅度小(约 2.5°),俯

仰角的时历变化曲线如图 3 所示。纵摇运动可基本忽略不计,故海豚运动主要为垂荡运动成分。

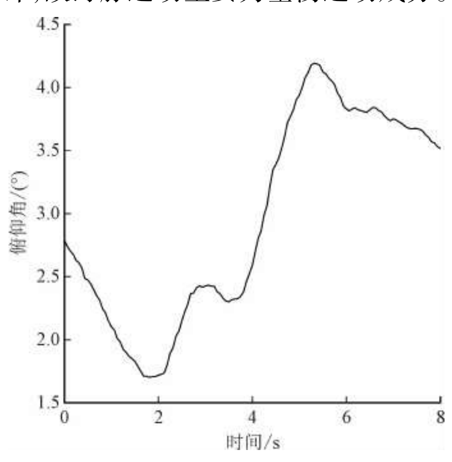


图 3 俯仰角时间历程曲线

Fig. 3 Time history curve of pitch angle

2 机翼振动

2.1 飞机固有动力特性

针对出现的机翼大幅振动现象,建立动力学模型并对其固有动力特性进行分析。根据结构形式,按照结构刚度以及连接刚度等效的原则将平尾、垂尾、机翼以及机身简化为单梁结构[8],使用梁元连接;将外挂发动机、浮筒简化为分布质量元,使用梁元与机翼连接;将起落架简化为集中质量元,使用梁元与机身连接;将操纵面简化为分布质量元,使用弹簧元与主翼面连接。为便于模型振动形态的识别,将平尾、垂尾、机翼以及机身的外形节点分别与梁节点连接在一起。固有动力特性简化模型如图 4 所示[9]。

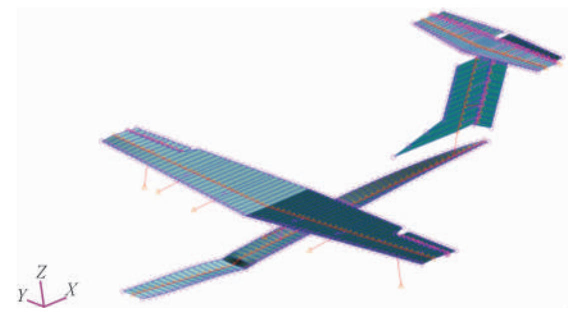


图 4 固有动力特性简化模型

Fig. 4 Simplified model of natural dynamic characteristics

为模拟飞机的自由飞行状态,将模型边界设为自由-自由状态。通过通用软件 MSC. NASTRAN 求解模型的固有频率和振型,解得机翼的一阶弹性模态为 2.4 Hz,模态振型如图 5 所示。

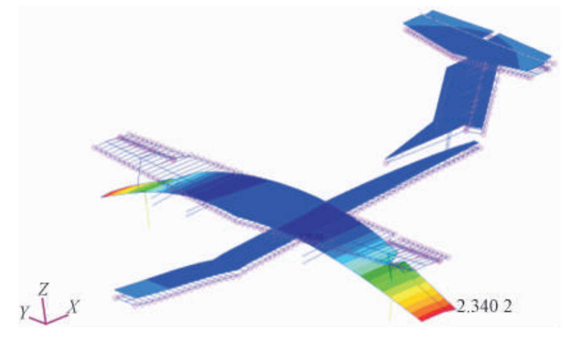


图 5 机翼一阶弹性模态

Fig. 5 First order elastic modal of wing

由飞行监控数据可知,飞机在水面滑水过程中,机翼翼尖的振动时间历程如图 6 所示,振动频谱如图 7 所示。

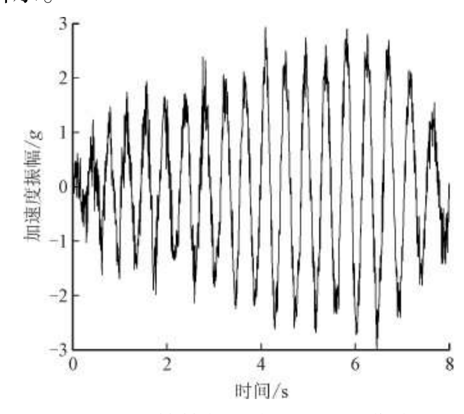


图 6 机翼翼尖振动时间历程曲线

Fig. 6 Time history curve of wingtip vibration

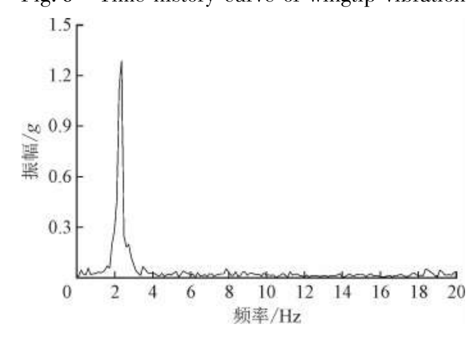


图 7 机翼翼尖振动频谱图

Fig. 7 Frequency spectrum of wingtip vibration

由图 6 和图 7 可以看出,机翼出现了幅值较大的周期振动 S,振动频率约为 2.4 Hz。与模型的固有动力特性分析所得机翼一阶弹性模态频率一致。

2.2 运动特性分析

2.2.1 双质量弹簧系统

质量、刚度、阻尼是结构动力学中最重要的 3 个动力学参数。虽然零阻尼结构只存在于理想结构,但绝大多数结构阻尼相对较小,即使系统阻尼比达

到10%，固有频率与无阻尼计算结果相比，误差也仅在0.5%以内。因此，研究振动、固有频率或模态问题时，可适当忽略阻尼的影响，所简化的本征结构的正确性不会受到影响[10]。

若阻尼及外载为0，系统的无阻尼自由振动运动方程为

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{u}}+\boldsymbol{K}\dot{\boldsymbol{u}}=\boldsymbol{0} \quad (1)$$

式中：$\boldsymbol{M}$、$\boldsymbol{K}$ 分别为质量矩阵和刚度矩阵；$\boldsymbol{u}$ 为位移矩阵。

对于线性结构，$\boldsymbol{M}$、$\boldsymbol{K}$ 为实对称阵，运动方程有简谐函数形式的解，即

$$\boldsymbol{u}=\boldsymbol{\phi}\sin\omega t \quad (2)$$

式中：$\boldsymbol{\phi}$ 为特征向量或振型；ω 为圆频率。

代入运动方程，可解出一系列离散的特征值 ω_i，每个特征值 ω_i 有特征向量 $\boldsymbol{\phi}_i$ 满足

$$(\boldsymbol{K}-\omega_i^2\boldsymbol{M})\boldsymbol{\phi}_i=\boldsymbol{0}, \quad (i=1,2,\cdots,n) \quad (3)$$

由上式可知，系统的动力学模型可等效为 n 个离散的自由振动型态叠加。可用双质量弹簧系统等效飞机系统的一阶振动型态，飞机系统的一阶模态囊括了系统大部分的振动能量，因此可看作双质量弹簧系统等效于飞机系统。1947 年，Mayo[11]研究了水上飞机着水时的水动力冲击问题，并使用了该方法对机身进行了质量简化。

将弹性体结构简化为由一根无质量弹簧相连的两个刚体的无阻尼的双质量系统，如图 8 所示。图中：m、k 分别为质量和弹性系数；x 为任意时刻 t 下质量块的位移。

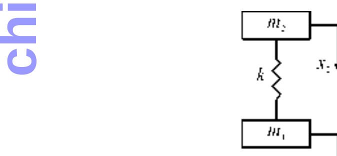


图 8 双质量弹簧系统

Fig. 8 Two-mass spring system

系统的运动微分方程为

$$\begin{cases} m_1\ddot{x}_1-kx_1+kx_2=0 \\ m_2\ddot{x}_2+kx_1-kx_2=0 \end{cases} \quad (4)$$

求解广义特征值问题，即

$$\begin{bmatrix} m_1\omega^2-k & k \\ k & m_2\omega^2-k \end{bmatrix}\boldsymbol{\phi}=0 \quad (5)$$

即可求得系统的固有圆频率为

$$\omega_1=0,\omega_2=\sqrt{\frac{m_1+m_2}{m_1m_2}k} \quad (6)$$

相应地可得到弹簧的弹性系数与结构固有频率之间的关系为

$$k=\frac{4\pi^2m_1m_2f}{m_1+m_2} \quad (7)$$

式中 f 为系统的固有频率。

由监控画面可以看到，在试飞高速滑行过程中，飞机断阶附近着水，吃水较小。根据上述方法将飞机质量离散为水面以下的质量 m_b 和水面以上的质量 m_a 两部分（$m_b \ll m_a$）。将弹性体飞机简化为由一根无质量的弹性系数为 k 的弹簧连接的双质量弹簧系统，m_b 为高速滑水过程中达到最大吃水时水面以下结构的质量。通过对该简化模型的运动分析来得到飞机水面高速滑行时的运动特性。系统的总重力通过升力和浮力平衡，质量简化模型如图 9 所示。

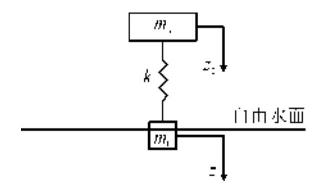


图 9 飞机简化质量模型

Fig. 9 Simplified mass model of aircraft

2.2.2 垂荡分析

当结构物在水面做滑行运动时，实际水面波浪情况复杂多变：一方面结构受波浪扰动发生摇荡运动，且 6 个自由度方向的运动相互耦合在一起；另一方面结构自身的运动对水面四周流场产生扰动，进而引起周围流体速度场和压力场持续变化。在以上因素影响的条件下，对结构物在水面的运动构建一个精确的力学模型相当困难。通常研究结构物在水面的摇荡运动时，做出如下假设[12]。

1）6 个自由度方向上的摇荡运动相互独立。

2）波浪为微幅平面进行波。

3）各摇荡运动幅值均为微幅。

基于以上假设，大大简化了力学模型的构建问题，可以通过线性理论分别研究飞机水面高速滑行时 6 个自由度方向上的摇荡运动。

在各个方向的摇荡运动中，纵摇以及垂荡对飞机在波浪上的滑行稳定性有重要影响，研究飞机在水面的运动主要分析纵摇与垂荡。如图 3 所示，在试飞高速滑水过程中，飞机俯仰角的变化幅度约 2.5°，故认为纵摇运动是稳定的。因此，本研究只分析讨论飞机的垂荡运动。

当飞机在微幅平面进行波作用下在平衡位置附近做微幅垂荡运动时，作用于飞机上的各个力相互

独立，分别单独展开研究。即研究因飞机运动而产生的力时，忽略波浪扰动的影响；研究波浪扰动力时，忽略飞机运动对垂荡的影响，即速度取为0。最后再通过线性叠加原理求出飞机受到的合力。

根据假设，飞机在微幅平面进行波作用下在平衡位置附近做微幅垂荡运动。故可以认为飞机在波长相对于结构入水半宽很长的规则波作用下做垂荡运动（认为在飞机剖面全宽范围内没有波面斜率作用，即不发生横摇，忽略横摇带来的影响），剖面受力分析如图10所示。

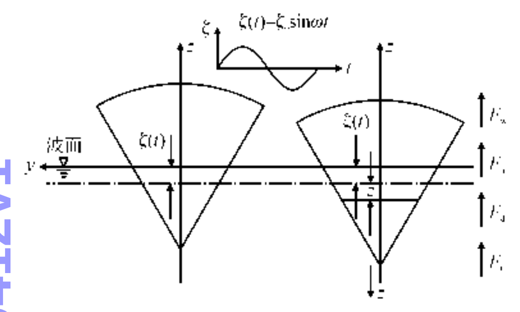


图10　飞机横剖面受力分析示意图

Fig. 10　Schematic diagram of force analysis of aircraft cross section

当飞机不受约束在波浪扰动力作用下做往复运动时，由牛顿第二定律可得

$$m\ddot{z} = F_r + F_d + F_a + F_w \tag{8}$$

式中：m 为飞机质量；$\ddot{z}$ 为飞机垂荡加速度；F_r 为水对飞机的垂向恢复力；F_d 为水对飞机的垂向阻尼力；F_a 为附加质量引起的惯性阻力；F_w 波浪扰动力。现对各个成分力进行说明。

1）飞机运动引起的力

垂向恢复力 F_r。由水陆两栖飞机自身静稳性，当飞机稳定时受到外界干扰，偏离平衡位置沿 z 轴产生平动位移时，引起吃水增大或者减小，当外界干扰消失时，飞机因自身静稳性回到初始平衡位置。当吃水改变微小时，$F_r = -\gamma S_w z$。其中：γ 为水的重度；S_w 为水线面面积；z 为飞机垂向位移。

垂向阻尼力 F_d。飞机在水上运动所受阻尼力按物理性质可分为3类：摩擦阻尼、旋涡阻尼、兴波阻尼。对于垂荡运动，旋涡阻尼和摩擦阻尼可以忽略，主要考虑兴波阻尼[13]。傅汝德认为，兴波阻尼与速度成正比，即 $F_d = -2C\dot{z}$，$2C$ 为阻尼系数。

惯性阻力 F_a。由于飞机的垂荡运动对流场的扰动使得飞机周围的流体质点作变速运动，作变速运动的流体质点的运动惯性反作用于飞机，从而产生了惯性阻力。$F_a = -\lambda_{zz}\ddot{z}$，$\lambda_{zz}$ 为飞机由于垂荡运动引起的附加质量值。

2）波浪扰动力

波浪扰动力 F_w。对于航速为0的飞机，波浪运动对飞机的扰动是导致飞机发生垂荡运动的主要作用力。波浪扰动力按性质可以分为由于流体动浮力作用引起的波浪主干扰力和流体动力本身两部分[14]。其中：波浪主干扰力一般由“克雷洛夫-傅汝德假说”认为波浪的压力场与飞机的存在无关，与波浪波幅成比例；流体动力是考虑了飞机结构的不可穿透条件，从而对波浪主干扰力的修正值。目前对流体动力计算的研究通常是认为流体动力由2种成分组成，分别与波浪的振荡速度和振荡加速度成比例[15]。

由于飞机在水面高速滑行过程中，水面基本保持平静，波浪基本可忽略不计。故取 $F_w = 0$。

将上述各个成分力代入式(8)，可得飞机在水面做垂荡运动的二阶线性运动微分方程，即

$$M\ddot{z} + 2C\dot{z} + Kz = 0 \tag{9}$$

式中：M 为惯性系数，$M_{zz} = m + \lambda_{zz}$；$2C$ 为阻尼系数；K 为弹性系数，$K = \gamma S_w$。

令初始条件为

$$\begin{cases} t = 0, z = z_0 \\ t = 0, \dot{z} = 0 \end{cases} \tag{10}$$

代入式(9)可得飞机的垂荡运动方程为

$$z = z_0\sqrt{1 + \frac{C^2}{\gamma S_w(m + \lambda_{zz})}}\mathrm{e}^{-\frac{C}{m+\lambda_{zz}}t} \times \cos\left[\sqrt{\frac{\gamma S_w}{m + \lambda_{zz}}}\ t - \arctan\left(\frac{C}{m + \lambda_{zz}}\sqrt{\frac{m + \lambda_{zz}}{\gamma S_w}}\right)\right] \tag{11}$$

由式(11)即可得垂荡固有频率为

$$f_{in} = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\gamma S_w}{m + \lambda_{zz}}} \tag{12}$$

根据试飞过程的高速滑水阶段的吃水情况，可以得到图9中的离散的飞机双质量弹簧系统的 m_b 值。由式(12)，给出不同附加质量值和水线面面积值下的垂荡固有频率。根据振动力学[16]，当垂荡固有频率在区间 $[f_{in}/\sqrt{2}, \sqrt{2}f_{in}]$ 时（f_{in} 为机翼的固有频率，即2.4 Hz），由于频率耦合作用，机翼会发生较大振动。如图11所示，在滑行过程中某个运动时刻下，飞机的附加质量和水线面面积落于标记区域时，飞机的垂荡固有频率与机翼一阶弹性模态频率发生耦合，导致机翼发生振动。

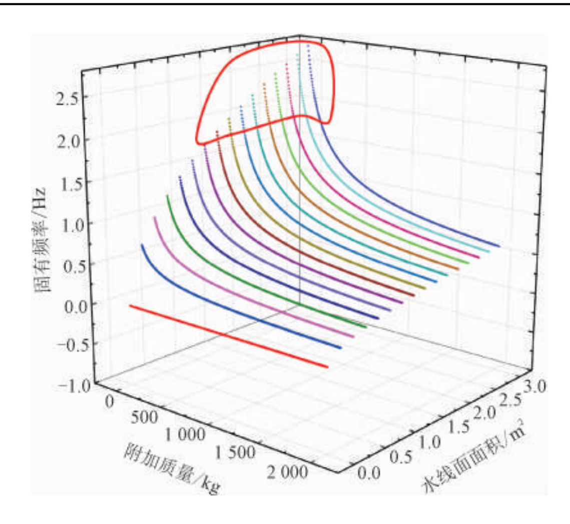


图 11 垂荡固有频率分布曲线

Fig. 11 Heave natural frequency distribution curve

3 结 论

水陆两栖飞机因特殊的使用模式和设计特点使得在民用机型某些应用领域具有独特优势,但水陆两栖飞机作业过程中不可避免地需在水面进行高速滑行运动。避免飞机在水面高速滑行过程中产生过度振动等异常运动现象,是振动设计过程中无比重要的一环。

本研究针对某型水陆两栖飞机在某次试飞过程的高速滑水阶段出现的异常运动现象展开研究。结果表明:该机因为着水和操纵的原因导致的外界波浪扰动以及自身静稳性等因素使得飞机在水面上发生海豚运动。在某时刻下,飞机的漂浮状态使得船体的垂荡固有频率与机翼的一阶弹性模态频率发生耦合时,引发共振,导致机翼发生等幅周期振动。本研究为水陆两栖飞机的振动设计和水面滑行振动分析提供了一种研究思路。

参考文献

[1] 中国民用航空局. 中国民用航空规章 第 25 部:CCAR-25 R4[S]. 北京:中国民用航空局,2009.

[2] 中国人民解放军总装备部. 军用飞机结构强度规范 第 7 部分:气动弹性:GJB 67.7A—2008[S]. 北京:中国人民解放军总装备部,2008.

[3] 邱啸. 海上伞降冲击与漂浮仿真分析[D]. 长沙:湖南大学,2012.

[4] 董祖舜. 我国对滑行艇、半滑行艇流体动力性能方面的研究及其进展[J]. 武汉造船,1995(2):1-6.
DONG Zushun. Research and progress on hydrodynamic performance of planning and semi planning boats in China[J]. Wuhan shipbuilding, 1995(2):1-6(in Chinese).

[5] 房红军,杨雷. 载人飞船返回舱着水冲击问题研究进展[J]. 载人航天,2013,19(6):76-83.
FANG Hongjun, YANG Lei. Review on water landing impact problems of manned reentry capsules[J]. Manned spaceflight, 2013,19(6):76-83(in Chinese).

[6] 陈超倩. 变空化数超空泡航行体智能控制及导引方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.

[7] 褚林塘. 水上飞机水动力设计[M]. 北京:航空工业出版社,2014.

[8] 李珂. 大展弦比飞翼布局飞机气动弹性特性研究[D]. 西安:西北工业大学,2007.

[9] MSC. NASTRAN release guide[M]. Los Angeles: The MacNeal Schwendler Corporation, 1994.

[10] 刘子豪. 基于质量-弹簧系统动力学修改的船舶动力装置减振技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017.

[11] MAYO W L. Solutions for hydrodynamic impact force and response of a two-mass system with an application to an elastic airframe[J]. 1947.

[12] 李积德. 船舶耐波性[M]. 哈尔滨:哈尔滨船舶工程学院出版社,1992.

[13] 盛振邦,刘应中. 船舶原理(上)[M]. 上海:上海交通大学出版社,2015.

[14] 周正全,张亮,戴遗山. 船舶在波浪中航行时绕射问题的线性时域解[J]. 中国造船,1993(3):1-25.
ZHOU Zhenquan, ZHANG Liang, DAI Yishan. Time-domain analysis of wave diffraction for ship motions with forward speed[J]. Shipbuilding of China, 1993(3):1-25(in Chinese).

[15] 朱军,庞永杰,徐玉如. 规则波浪中舰船操纵运动计算[J]. 哈尔滨工程大学学报,2004(1):1-5.
ZHU Jun, PANG Yongjie, XU Yuru. Maneuvering prediction of a ship in regular waves[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2004(1):1-5(in Chinese).

[16] 胡海岩. 机械振动基础[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2010.

(编辑 黄崇亚)